

# MAXIによる重力波源の電磁波対応天体の観測

杉田 聡 司

〈青山学院大学理工学部物理・数理学科〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1〉

e-mail: sugita@phys.aoyama.ac.jp

2017年8月17日に中性子星連星の合体による重力波イベントが初めて検出され、その電磁波対応天体が同定された。これにより重力波やガンマ線バースト（GRB）の研究は大きな盛り上がりを見せた。しかし発見された電磁波対応天体はまだ1例のみである。MAXIは1周回（約92分）で全天を走査するため、重力波の到来方向の誤差範囲を広くカバーした観測が行える。感度的には近傍で発生した短いGRBの残光が検出できると推定され、数多くある電磁波観測の中でもユニークな成果が期待できる。本稿ではMAXIによる重力波源の電磁波対応天体の観測の狙いとこれまでの観測結果、および2019年4月に開始した重力波検出器の第3回観測期間（O3）における観測体制の更新について報告する。

## 1. 重力波源の電磁波対応天体

2015年9月14日に重力波検出器Advanced LIGOによってブラックホール同士の合体に伴う重力波が初めて検出された<sup>1)</sup>。一般にバースト的な重力波はブラックホールや中性子星など高密度天体が強い重力の下で激しく運動することで発生しており、そこで起こる高エネルギー天体現象からは、電磁波の放射も期待できる。特に中性子星同士が合体する時には、短いガンマ線バースト（SGRB）が発生すると考えられており、SGRBに同期した重力波の検出と、その電磁波対応天体の観測が待ち望まれていた。

2017年8月17日にAdvanced LIGOとVirgoによって中性子星連星の合体による重力波（GW170817）が初めて観測された<sup>2)</sup>。世界中の観測者によって、LIGO-Virgo Collaboration（LVC）と連携した重力波源電磁波対応天体（以下重力波天体と称す）に対する追観測体制が組まれており、重力波発生の1.7秒後にガンマ線放射が観測され、半日後には重力波検出器が決めた誤差方向の範囲

内に可視光で対応天体が発見され、数多くの多波長追観測が行われた<sup>3)</sup>。すでに月報特集記事で解説されているのでそれぞれの観測結果の詳細はここでは省略するが<sup>4)-6)</sup>、重力波と同期したガンマ線イベントGRB170817Aは従来のSGRBと同様に継続時間が短く<sup>7)</sup>、可視光・赤外線放射からキロノバによるrプロセス元素合成の証拠が見つかるなど<sup>8)</sup>、予想されていた中性子星連星の合体の描像に一致し解明された印象がある。しかし重力波天体の観測はまだ1例のみであり、GRB170817AのX線残光に関しては従来のSGRBとは異なる特徴を持つなど全てが解明したわけではない。重力波天体の電磁波観測は2例目以降も重要である。

## 2. MAXIによる観測

### 2.1 全天モニタと電磁波対応天体

ではMAXI/GSCは重力波天体に対してどのような観測が行えるか。鍵となるのは高い観測カバー率と速報である。

全天モニタであるMAXI/GSCは走査型の検出器であるため瞬間的な視野は狭く、また特定の方

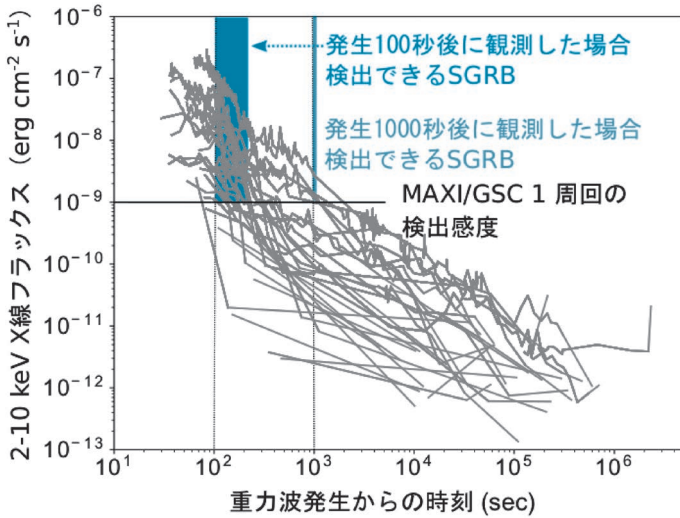


図1 近傍で発生した場合に換算した SGRB の X 線残光光度曲線と MAXI/GSC の検出限界の関係。灰色線はこれまで観測された SGRB 残光が O3 の限界距離 170 Mpc で発生した場合の X 線フラックス。黒線は MAXI/GSC 1 周回の検出限界。

向を向き続けることはできないため、SGRB のような短い時間スケールの突発天体の観測は得意とは言えない（芹野の特集記事<sup>9)</sup>を参照）。一方で、SGRB の残光のように長く続く現象では MAXI に利がある。92 分で全天の約 80% を観測する MAXI であれば、数十平方度と大きい誤差範囲を持つ重力波イベントの X 線残光を早期に発見し、到来方向を 0.2 程度の範囲で決定できる可能性がある。図 1 は SGRB の X 線残光の時間変化と MAXI/GSC 1 周回の検出感度を比較したものである。MAXI/GSC の 1 天体の観測時間は軌道 1 周回（92 分）につき約 100 秒間であり、もし重力波天体の方向を向くタイミングが発生直後であれば 90% の SGRB が、1000 秒後であれば 15% の SGRB が検出感度を上回る。このように近傍で発生した SGRB の残光であれば、検出感度的に観測が可能と推定される。

重力波イベント GW170817 に付随した SGRB で

ある GRB170817A では、X 線残光は重力波発生から 2 週間遅れてようやく出現し、かつ極めて暗かった<sup>10)</sup>。これは、従来の SGRB の残光の持つ、最初は明るく時間のべき乗で減光する特徴とは大きく異なる。このため GRB170817A の検出は、SGRB が中性子星連星の合体が起源であるという従来の定説の確実な証拠には至らなかった。GRB170817A が特別で、重力波イベントに付随する SGRB の多くが従来の例と同様にべき乗で減光しているのか、やはり重力波天体では異なる特徴なのか、これを明らかにするには両者の差が大きい早期の X 線残光の観測が鍵となる。MAXI の観測が SGRB の起源を解明する手がかりとなることが期待される。

二つ目の鍵である速報については、MAXI ではデータを自動監視する突発天体発見システムが構築されており<sup>11)</sup>、重力波天体かどうかによらず MAXI チームで 24 時間の速報体制を敷いている。重力波イベントの誤差範囲内に統計的に有意なイベントが検出された時には、MAXI による位置情報は全世界に確実に速報されることになる。もし MAXI によって早期に位置を決定し速報することができれば、感度の高い望遠鏡による観測をより初期から行うことができる。

## 2.2 これまでの観測

MAXI チームは 2015 年 9 月から LVC と協定しており、重力波検出のアラートを受けて観測データから重力波天体の探査を行ってきた。重力波発生時刻に観測が行われているかを確認し（放射線が強い高緯度では観測を停止しているため）、重力波イベントの誤差範囲内に X 線新天体が検出されているかチェックする。ここで言う X 線新天体とは、統計的に有意な X 線光子量の像が、既知の X

\*1 GCN はもともと GRB 速報ネットワークだが、そのまま重力波天体の観測速報にも使われている。

線天体に対応しない位置に出現し、かつ点源と矛盾しない大きさであった場合を指す。もし有意な X 線新天体が検出されていれば真っ先に速報し、なければ X 線フラックスの上限値とともに重力波天体メーリングリスト (GCN\*) に報告する<sup>12)</sup>。以下、代表的な重力波イベントの観測結果を示す。

#### GW150914

Advanced LIGO が検出した最初の重力波源である。ブラックホール同士の合体のため、理論的には電磁波の観測は期待されないが、初めての重力波イベントとあって、電磁波による誤差範囲の追観測が一斉に行われた。発生時 MAXI/GSC は高緯度のため観測を行っていなかったが、発生から 92 分後までに重力波イベントの誤差範囲 (610 平方度) のうちの 95% をカバーした。その結果、領域内に有意な X 線新天体は検出されず、X 線フラックスの上限値 ( $9.5 \times 10^{-10} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) を報告した<sup>13)</sup>。他の電磁波の観測からも重力波の電磁波天体は発見されていない。

#### GW151226

2 番目の重力波源で、ブラックホール同士の合体であり、電磁波対応天体は発見されていない。その発生時には MAXI/GSC は観測中であり、発生から 4 分後まで観測を続けた。発生から 92 分後までに重力波イベントの誤差範囲 (850 平方度) のうち 84% をカバーした。また突発天体発見システムによって、発生から 96 分後に重力波イベントの誤差範囲内で X 線新天体の候補が検出されたが、有意度が基準値 (バックグラウンドの揺らぎの 3 倍) に達していなかったため GCN ではこの件は報告しなかった<sup>14)</sup>。

#### GW170817

初の中性子星同士の合体による重力波イベントである。LIGO に加え、Virgo の観測が開始された

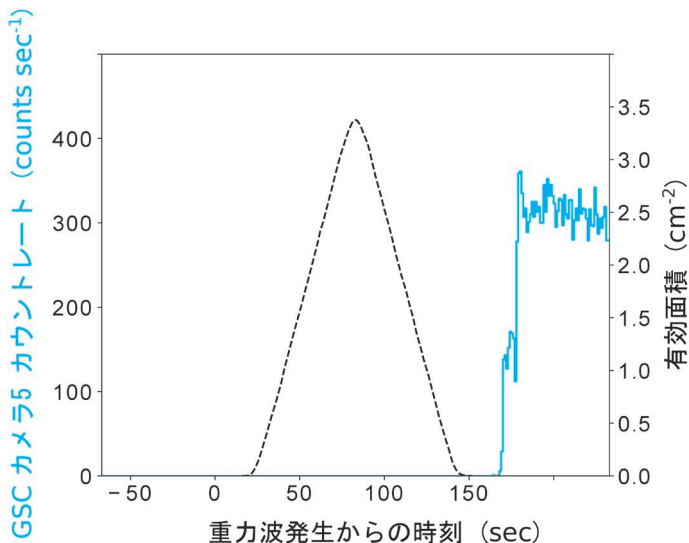


図2 GW170817 発生時の MAXI/GSC のデータ。点線は重力波天体に対する GSC カメラ 5 の視野 (有効面積) の推移。実線は GSC カメラ 5 のカウントレート。173 秒までは観測を中断していた。

ため重力波イベントの誤差範囲が 28 平方度と一気に小さくなり、可視光で重力波天体が発見された。MAXI/GSC は重力波発生 77 秒後という早いタイミングで重力波天体の方向を向いたが、不運にも観測を行っていなかった。地球の極に近い高緯度の上空では荷電粒子による放射線が非常に強く、検出器を保護するために高圧電源を落とし観測を中断している。MAXI/GSC が 1 周回でカバーできていない残り 20% の大半は、この高放射線帯を通過している時間である。図2のように MAXI/GSC が重力波天体の方向をスキャンしたのはこの高放射線帯を抜ける直前で、それは観測開始のわずか 173 秒前であった。国際宇宙ステーションの軌道は周回毎に少ししか変わらないので、ひとたび観測しない領域に入ってしまうと数周回は観測できない状況が続く。結局、軌道が放射線帯から逸れて重力波天体の方向を観測できるようになったのは発生から 4 時間 40 分後であった。それでも X 線観測では最速であり、X 線フラックスの上限値 ( $8.6 \times 10^{-9} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) を報告した<sup>15)</sup>。



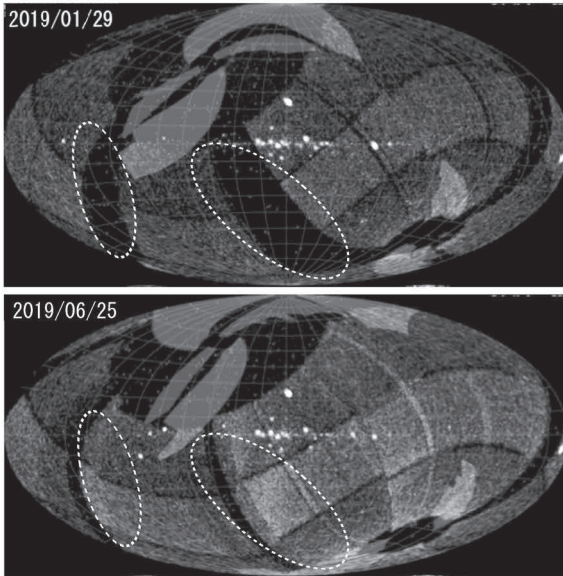
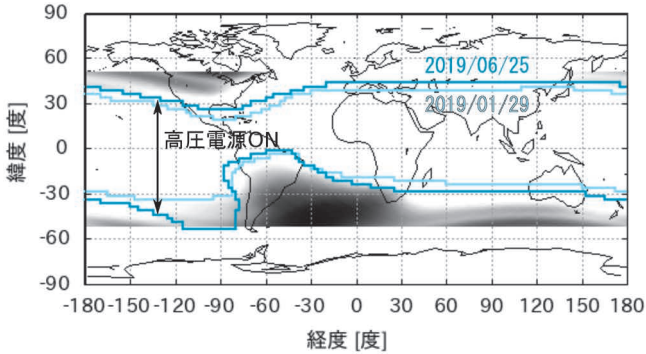


図3 荷電粒子の強度マップ (上), および観測時間拡大前 (中) と拡大後 (下) の1周回の前転画像. (上) では黒の濃淡が荷電粒子強度を表し, 色付き線が検出器の観測 ON/OFF の境界線である. 観測 ON 領域を拡大したことで観測ギャップ (白破線領域) が埋まり全天カバー率が増加した.

### 3. そしてO3

2019年4月から重力波検出器は第3回観測期間 (O3) というフェーズに入っている. 機器の改良と調整が進んだことで, それ以前より遠く (~170 Mpc) の中性子星の合体の検出が可能となり, 観測数は年間で最大50程度と飛躍的に多くなることが予想された<sup>16)</sup>. 実際に2019年4月には中性子星の

合体の候補が2例, 報告された (ただし遠すぎて電磁波放射は検出されていない). すでに述べたように, MAXIによる重力波天体の観測で鍵になるのは観測カバー率の高さと速報である. これらの利点をより伸ばすべくO3に向けてMAXI/GSCでは次のようなアップデートを行った.

#### 3.1 観測時間の拡大

国際宇宙ステーションの軌道傾斜角は51.6度なので1周回中に高緯度を必ず通るため, 二つのカメラセットを合わせても1周回の全天カバー率は80%程度にとどまる. このカバー率を100%に近づけるため観測時間の拡大を試みた.

検出器をON/OFFするタイミングは図3 (上) に示した, 地球上空の荷電粒子強度分布をもとに決定している. 2019年初頭までは検出器の損傷を抑えるよう, 荷電粒子の多い領域にマージンを多く設けた領域で観測をONにしていた. O3に向けてこのマージンを慎重に削り, 観測ONの領域を拡大した. 拡大運用後は観測のギャップが埋められ, 図3 (下) では全天カバー率を9%増加させることに成功した<sup>\*2)</sup>.

#### 3.2 速報体制の改善

前回の観測期間 (O2) までは重力波イベントの発生頻度が低かったこともあり, 担当者がアラートに反応して手で解析を行いGCNへ報告するという手順であった (解析の詳細と苦勞は月報記事<sup>9)</sup> に詳しい). 重力波天体のアラートはO3からは月6件程度に増加している. そこでMAXIによる速報が遅れないよう, 重力波天体の解析に専用の計算機を用意し, 速報の自動化を進めた. この計算機ではアラートメールを

\*2 軌道によっては低緯度でも放射線が強い領域を通過するので毎軌道のカバー率を100%にはできていない.

受けた直後に重力波天体の自動解析が行われ、結果を web などで常時確認できるようになった。GCN への観測カバー率と上限値の報告の際にはスマートフォンなどの端末からでも解析結果をチェックし投稿することが可能である。これにより投稿までの時間が安定して早くなった (92+数十分)。現在、解析結果の公開用 web ページを準備中である。

重力波天体を MAXI が今後も観測し続け、SGRB の起源の解明に貢献できるよう、これからも最善を尽くして運用を行なっていきたい。

## 謝 辞

本稿は MAXI チーム重力波天体対応メンバーの活動と結果のまとめとして執筆した。また本研究は、新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」, 「重力波物理学・天文学: 創世記」の支援の元に行われた。

## 参考文献

- 1) Abbott, B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102
- 2) Abbott, B. P., et al., 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- 3) Abbott, B. P., et al., 2017, ApJ, 848, L12
- 4) 坂本貴紀, 2018, 天文月報, 111, 82
- 5) 内海洋輔, 2018, 天文月報, 111, 84
- 6) 田中雅臣, 2018, 天文月報, 111, 86
- 7) Goldstein, A., et al., 2017, ApJ, 848, L14
- 8) Tanaka, M., et al. 2017, PASJ, 69, 102
- 9) 芹野素子, 2019, 天文月報, 112, 717
- 10) Troja, E., et al., 2017, Nature, 551, 71
- 11) Negoro, H., et al., 2016, PASJ, 68, S1
- 12) 芹野素子, 2017, 天文月報, 110, 25
- 13) Kawai, N., et al., 2017, PASJ, 69, 84
- 14) Serino, M., et al., 2017, PASJ, 69, 85
- 15) Sugita, S., et al., 2018, PASJ, 70, 81
- 16) Abbott, B. P., et al., 2018, Living Reviews in Relativity, 21, 3

## MAXI observations of gravitational wave sources

Satoshi SUGITA

*Department of Physics and Mathematics,  
Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe,  
Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5258,  
Japan*

Abstract: MAXI scans about 85% of the whole sky every 92 minutes with the orbital of the International Space Station. It is suitable to search for X-ray afterglow or extended emission of gamma-ray bursts (GRBs) accompanied by electromagnetic (EM) counterparts of GW events. We report the status of the search for the EM counterparts and the update of high-voltage operation and analysis environment for the LIGO-Virgo O3.